



Docket No.: L&L-10217

I hereby certify that this correspondence is being deposited with the United States Postal Service as First Class Mail in an envelope addressed to the Commissioner for Patents, P.O. Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450 on the date indicated below.

By: Markus Nollf Date: August 28, 2003

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicant : Jörg Berthold, et al.
Applic. No. : 10/620,093
Filed : July 15, 2003
Title : Method for Determining the Critical Path of an Integrated Circuit

CLAIM FOR PRIORITY

Commissioner for Patents,
P.O. Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450

Sir:

Claim is hereby made for a right of priority under Title 35, U.S. Code, Section 119, based upon the German Patent Application 101 01 540.2, filed January 15, 2001.

A certified copy of the above-mentioned foreign patent application is being submitted herewith.

Respectfully submitted,

Markus Nollf
For Applicant

MARKUS NOLFF
REG. NO. 37,006

Date: August 28, 2003

Lerner and Greenberg, P.A.
Post Office Box 2480
Hollywood, FL 33022-2480
Tel: (954) 925-1100
Fax: (954) 925-1101

/av

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 101 01 540.2

Anmeldetag: 15. Januar 2001

Anmelder/Inhaber: Infineon Technologies AG, München/DE

Bezeichnung: Verfahren zur Bestimmung des kritischen Pfades
einer integrierten Schaltung

IPC: G 06 F, G 01 R

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 31. Juli 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Klostermeyer

Beschreibung

Verfahren zur Bestimmung des kritischen Pfades einer integrierten Schaltung

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bestimmen eines oder mehrerer kritischer Pfade einer integrierten Schaltung.

10

Kritische (Signal-)Pfade sind diejenigen Pfade einer integrierten Schaltung, welche die Signalverarbeitungsgeschwindigkeit der Schaltung und damit ihre Leistungsfähigkeit begrenzen. Soll die Leistungsfähigkeit der Schaltung gesteigert werden, muß zunächst der kritische Pfad ermittelt und dann durch Optimierung beschleunigt werden. Letzteres kann dadurch erfolgen, daß die Signallaufzeit dieses Pfades durch stärkere Transistoren oder Gatter verkürzt wird.

15

20

Üblicherweise wird davon ausgegangen, daß in einer integrierten Schaltung der kritische Pfad durch den "längsten" Pfad (d.h. den Pfad mit der maximalen Signallaufzeit T_m) bestimmt ist. Ein Ziel der Schaltungsentwicklung ist es daher, diesen längsten Pfad in der Schaltung ausfindig zu machen.

25

30

Das konventionelle Vorgehen zum Auffinden des kritischen bzw. längsten Pfads einer Schaltung besteht darin, daß im Verlauf einer Analyse oder Simulation der Schaltung anhand des Schaltungsentwurfs für jeden Pfad festgestellt wird, ob er länger ist als der längste der bis dahin untersuchten Pfade. Wenn er kürzer ist, wird er im folgenden nicht weiter berücksichtigt. Wenn er länger ist, wird er so lange als kritischer Pfad betrachtet, bis gegebenenfalls ein noch längerer Pfad ermittelt wird.

35

Es ist auch bereits bekannt, für eine integrierte Schaltung mehrere kritische Pfade zu bestimmen. Beispielsweise können sämtliche analysierten Pfade, deren Signallaufzeit in das In-

tervall mit den Grenzen $0,95 \times T_m$ bis T_m fallen, als kritische (und somit zu optimierende) Pfade definiert werden.

Die vorliegende Erfindung beruht auf der Erkenntnis, daß dieses Verfahren bei modernen CMOS-Technologien nicht mehr anwendbar ist. Dies liegt darin begründet, daß bei modernen CMOS-Technologien die unkorrelierte statistische Schwankung der Transistoreinsatzspannung zunimmt, wobei die Standardabweichung der Verteilung der Einsatzspannung inzwischen bis zu 40mV betragen kann. Dementsprechend schwanken die Gatter- und Pfadlaufzeiten, wobei letzere darüber hinaus von der Anzahl der Gatter in dem betrachteten Pfad abhängen. Diese Gesichtspunkte werden bei dem bekannten Verfahren zur Ermittlung des kritischen Pfades nicht berücksichtigt.

Durch die gegenwärtig in der Technik betriebene Absenkung der Versorgungsspannung wird der beschriebene Effekt (Einfluß der Schwankung der Einsatzspannung auf die Kritizität der Pfade) noch verstärkt. Die Versorgungsspannung beträgt bei einer $0,12\mu\text{m}$ -Technologie nur noch etwa 1.2Volt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein verbessertes Verfahren für die Bestimmung eines oder mehrerer kritischer Pfade einer integrierten Schaltung anzugeben. Insbesondere soll das Verfahren für Schaltungen mit niedrigen Versorgungsspannungen mit Vorteil einsetzbar sein.

Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabenstellung wird durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst.

Demzufolge werden zunächst die in der integrierten Schaltung vorgesehenen Pfade, ihre mittleren Pfadlaufzeiten und ihre Pfadlaufzeitschwankungen bestimmt. Die Pfade werden dann nach statistischen Gesichtspunkten geordnet, d.h. Pfade, die im wesentlichen dieselben mittleren Pfadlaufzeiten und dieselben Pfadlaufzeitschwankungen aufweisen, werden zu einem Pfadensemble zusammengefaßt. Zu jedem Pfadensemble wird dann ein

Ensemblemaß berechnet, welches die Pfadlaufzeitverteilung dieses Pfadensembles statistisch beschreibt. Die statistische Beschreibung berücksichtigt dabei sowohl, daß ein Pfad in der Regel aus mehreren Gattern besteht, als auch die Tatsache,
5 daß in einem Pfadensemble zumeist mehrere Pfade (mit im wesentlichen identischen statistischen Eigenschaften) enthalten sind. Darüber hinaus wird für die Gesamtheit der betrachteten Pfade ein Maß berechnet, welches als Gesamtmaß bezeichnet wird und welches die Laufzeitverteilung der Gesamtheit der
10 betrachteten Pfade statistisch beschreibt. Zuletzt werden anhand eines Vergleichs der Ensemblemaße bei oder oberhalb einer kritischen Pfadlaufzeit T_c der oder die kritischen Pfade der Schaltung bestimmt. Die Ermittlung der kritischen Pfadlaufzeit T_c erfolgt dabei unter Berücksichtigung des Gesamt-
15 maßes.

Der Begriff "integrierte Schaltung" kann vorliegend sowohl eine integrierte Schaltung in ihrer Gesamtheit (Chip) als auch einen Teilabschnitt einer integrierten Schaltung be-
20 zeichnen.

Ein wesentlicher Aspekt der Erfindung besteht somit darin, sowohl die in einem Pfadensemble auftretenden Pfadlaufzeiten als auch die in der gesamten betrachteten Schaltung auftre-
25 tenden Pfadlaufzeiten statistisch zu beschreiben. Damit werden Pfadlaufzeitschwankungen in den Pfadensembles und in der gesamten betrachteten Schaltung statistisch erfaßt. Die Bewertung eines Pfads beziehungsweise der Pfade eines Ensembles im Hinblick auf Ihre "Länge" wird – anders als bei den her-
30 kömmlichen Verfahren – dann unter Berücksichtigung aller Pfade durchgeführt. Dies kommt dadurch zum Ausdruck, daß die kritische Pfadlaufzeit T_c unter Berücksichtigung des Gesamtmaßes ermittelt wird.

35 Vorzugsweise wird für die Bestimmung des oder der kritischen Pfade ein Wert für das Gesamtmaß vorgegeben und die kritische Pfadlaufzeit T_c wird als diejenige Pfadlaufzeit ermittelt,

bei welcher das Gesamtmaß den vorgegebenen Wert annimmt. Da das Gesamtmaß eine statistische Beschreibung der in der Schaltung auftretenden Pfadlaufzeiten ist, kann der vorgegebene Wert als Konfidenzwert interpretiert werden.

5

Eine weitere bevorzugte Ausführungsweise des erfindungsgemäßen Verfahrens kennzeichnet sich dadurch, daß als kritische Pfade (nur) diejenigen Pfade bestimmt werden, deren Ensemblemaße bei oder oberhalb der kritischen Pfadlaufzeit einen vorgebbaren Schwellenwert überschreiten. Dadurch wird erreicht, daß von den potentiell kritischen Pfaden (das sind diejenigen Pfade, die bei oder oberhalb der kritischen Pfadlaufzeit ein nicht verschwindendes Ensemblemaß aufweisen) nur die mit einem höheren statistischen Gewicht tatsächlich als kritische Pfade betrachtet werden.

15

Eine weitere vorteilhafte Maßnahme des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht darin, daß nach dem anfänglichen Bestimmen der in der integrierten Schaltung vorgesehenen Pfade und ihrer mittleren Pfadlaufzeiten bereits eine Vorauswahl der im weiteren Verfahrensablauf noch zu berücksichtigenden Pfade vorgenommen wird, derart, daß diejenigen Pfade sogleich verworfen werden, deren mittlere Pfadlaufzeiten kleiner als $\alpha \times T_m$ ist, wobei T_m die maximale im vorhergehenden Schritt ermittelte mittlere Pfadlaufzeit ist und α eine Größe kleiner als 1 ist und insbesondere etwa 0,8 betragen kann. Dadurch kann der für die folgenden Verfahrensschritte erforderliche Rechenaufwand deutlich reduziert werden.

25

Eine vorteilhafte Definition des Ensemblemaßes kennzeichnet sich dadurch, daß dieses durch das Integral über die Summe der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Pfadlaufzeiten der Pfade des betrachteten Pfadensembles gegeben ist. In diesem Fall kann für die Berechnung der Summe der Wahrscheinlichkeitsverteilungen (der Pfadlaufzeiten der Pfade des betrachteten Ensembles) das Produkt aus der Anzahl der Pfade des Pfadensembles und der Wahrscheinlichkeitsverteilung eines

35

Pfades dieses Pfadensembles gebildet werden. Bei dieser Näherung werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen sämtlicher Pfade des Pfadensembles als identisch angenommen. Dadurch wird der Rechenaufwand für die Berechnung des Ensemblemaßes reduziert.

Das Gesamtmaß kann beispielsweise durch die Summe der Ensemblemaße gegeben sein.

Es wird darauf hingewiesen, daß das Ensemblemaß und das Gesamtmaß auch auf andere Weise definierte statistische Funktionen sein können. Wesentlich für die Erfindung ist lediglich, daß die Bestimmung der kritischen Pfade durch eine statistische Bewertung der Pfadlaufzeiten sämtlicher relevanten Pfade der Schaltung erfolgt.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand eines Ausführungsbeispiels unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert; in dieser zeigt:

20

Fig. 1 eine schematische Darstellung verschiedener Pfade in einer Schaltung;

25

Fig. 2 ein Diagramm, in welchem die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Pfadlaufzeiten eines Pfads bestehend aus 9 Gattern dargestellt ist;

30

Fig. 3 ein Diagramm, in welchem die Wahrscheinlichkeitsfunktion (Ausbeute) und die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Signallaufzeiten eines Pfads bestehend aus neun Gattern dargestellt sind;

35

Fig. 4 ein Diagramm, in welchem die Wahrscheinlichkeitsfunktionen (Ausbeuten) der Pfadlaufzeiten eines Pfadensembles bezüglich einer unterschiedlichen Anzahl n von in dem Ensemble enthaltenen Pfaden dargestellt ist;

Fig. 5 ein Diagramm, in welchem die Wahrscheinlichkeitsfunktionen (Ausbeuten) eines Pfades bestehend aus 10 Gattern und eines Pfadensembles bestehend aus 1000 Pfaden mit jeweils 9 Gattern dargestellt sind;

Fig. 6 ein Diagramm, in welchem die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Pfadlaufzeiten eines Pfades bestehend aus 10 Gattern und die Häufigkeitsverteilung eines Pfadensembles bestehend aus 1000 Pfaden mit jeweils 9 Gattern dargestellt sind;

Fig. 7 ein Diagramm, in welchem die Integralmaße der in Fig. 6 dargestellten Funktionen sowie die Summe dieser beiden Funktionen dargestellt sind, wobei die Integrationsrichtung von hohen Pfadlaufzeiten zu kleinen Pfadlaufzeiten führt; und

Fig. 8 einen vergrößerten Ausschnitt des in Fig. 7 gezeigten Diagramms.

Fig. 1 zeigt in beispielhafter Form eine Schaltung (beziehungsweise einen Schaltungsabschnitt), welche(r) einen Pfad P1 bestehend aus 10 seriell angeordneten Gattern G1, G2, ..., G10 (Typ A) und n identische Pfade P1', P2', ..., Pn' bestehend jeweils aus 9 seriell angeordneten Gattern G1', G2', ..., G9' (Typ B) umfaßt. Die Pfade P1 bzw. P1', ..., Pn' verbinden jeweils getaktete Eingabe- und Ausgaberegister RE, RA bzw. RE' und RA'. Bei dem einzelnen Pfad P1 kann es sich beispielsweise um einen Pfad in einer Steuerungseinheit handeln, während die n identischen Pfade P1', P2', ..., Pn' typischerweise eine Verarbeitungseinheit wie beispielsweise einen Addierer oder einen Multiplizierer bilden. Beispielsweise weist ein 32 x 32-Multiplizierer bei einer 31-stufigen Pipeline 1024 Pfade der Länge von jeweils 8 Gattern auf.

Bei der herkömmlichen Zeitanalyse einer solchen Schaltung zur Ermittlung des kritischen Pfads wird festgestellt, daß der Pfad P1 der längste Pfad ist, da seine Signallaufzeit um eine Gatterlaufzeit länger als die Signallaufzeiten sämtlicher anderer Pfade P1', P2', ..., Pn' ist. Demzufolge würde der Pfad P1 im Stand der Technik als kritischer Pfad identifiziert werden. Soll die Leistungsfähigkeit der Schaltung gesteigert werden, wäre der Pfad P1 durch Optimierung zu beschleunigen.

10 In dem in Fig. 2 dargestellten Diagramm ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Pfadlaufzeiten eines der identischen Pfade P1', P2', ..., Pn' vom Typ B bestehend aus 9 Gattern über der Pfadlaufzeit, angegeben in Einheiten von ns, dargestellt. Hervorgerufen durch Schwankungen der Gatterlaufzeit
15 weist die Wahrscheinlichkeitsverteilung (Kurve K1) eine gewisse Breite auf. Würde demgegenüber keine Schwankung der Gatterlaufzeiten auftreten, wäre die Wahrscheinlichkeitsverteilung durch den scharfen Wert W1 = 1 (d.h. 100% Wahrscheinlichkeit) bei einer Pfadlaufzeit von 9ns gegeben.

20

Die durch die Kurve K1 dargestellte Wahrscheinlichkeitsverteilung ist eine Normalverteilung, welche durch ihren Mittelwert und ihrer Standardabweichung beschrieben wird. Bei dem hier dargestellten Beispiel beträgt der Mittelwert 9ns und
25 die Standardabweichung beträgt 5% des Mittelwertes.

25

Der Mittelwert und die Standardabweichung der Wahrscheinlichkeitsverteilung K1 lassen sich in bekannter Weise aus den Mittelwerten und Standardabweichungen der einzelnen Gatterlaufzeiten berechnen, welche zu der Pfadlaufzeit beitragen.
30 Der Mittelwert der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Pfadlaufzeit ist die Summe der Mittelwerte der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Gatterlaufzeiten und die Standardabweichung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Pfadlaufzeit ist
35 die Wurzel der Summe der quadrierten Standardabweichungen der Verteilungen der Gatterlaufzeit bezüglich der einzelnen Gattern. Wird für sämtliche Gatter eines Pfades eine identische

Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Gatterlaufzeit vorausgesetzt, ergibt sich

$$\mu_P = N \cdot \mu_G$$

$$5 \quad \sigma_P = \sqrt{N} \cdot \sigma_G,$$

wobei μ_P der Mittelwert der Pfadlaufzeit-Verteilung, μ_G der Mittelwert der Gatterlaufzeit-Verteilung, σ_P die Standardabweichung (Streuung) der Pfadlaufzeit-Verteilung und σ_G die Standardabweichung der Gatterlaufzeit-Verteilung ist. Mit N wird die Anzahl der Gatter (mit identischer Wahrscheinlichkeitsverteilung) des betrachteten Pfades bezeichnet.

Es wird darauf hingewiesen, daß die einzelnen Gatterlaufzeit-Verteilungen unkorreliert sind. Die Ursache für das Auftreten der Schwankungen liegt in der endlichen Anzahl der bei der Dotierung implantierten Ionen. Nicht betrachtet werden bei dieser Analyse Schwankungen, die auf systematische Effekte (z.B. Änderungen in den Herstellungsbedingungen) zurückzuführen sind und daher korreliert sind.

Die statistischen Größen μ_P beziehungsweise μ_G entsprechen der nominellen Pfadlaufzeit beziehungsweise der nominellen Gatterlaufzeit, d.h. denjenigen Laufzeiten, die bei einer definiert vorgegebenen, bei allen Transistoren gleichen Einsatzspannung auftreten würden.

Bei dem in Fig. 2 dargestellten Beispiel beträgt die Standardabweichung der Gatterlaufzeit 15% des Mittelwertes μ_G der Gatterlaufzeit.

Die in Fig. 2 gezeigte Wahrscheinlichkeitsverteilung kann durch Aufintegrieren in eine Ausbeutekurve umgeformt werden. Die Ausbeutekurve entspricht der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Normalverteilung. Die Abszisse gibt jetzt nicht mehr die Pfadlaufzeit an, sondern stellt die Periode des Taktsignals clk dar, mit dem die in Fig. 1 gezeigten Register RE' und RA'

getaktet werden. Liegt die Taktperiode bei 9ns, so liegt die Ausbeute bedingt durch die Pfadlaufzeitschwankung lediglich bei 50%. Erst bei längeren Taktperioden von ca. 9.4ns liegt die Ausbeute bei 90%. D.h., wenn das Eingaberegister RE' zu einer Bezugszeit $t = 0$ an seinem Ausgang vom logischen Zustand 0 zum logischen Zustand 1 wechselt und zum Zeitpunkt $t = 9,4\text{ns}$ das Ausgaberegister RA' den logischen Zustand am Ausgang des Pfades P1' ausliest, ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß sich die Zustandsänderungen am Eingang des Pfades P1' mittlerweile am Ausgang bemerkbar gemacht hat, 90%.

In Fig. 3 bezeichnet K2 die Ausbeutekurve. Sowohl die Ausbeutekurve K2 als auch die Kurve der Wahrscheinlichkeitsverteilung K1 sind gegenüber der Taktperiode (d.h. der Länge des betrachteten Pfads vom Typ B) aufgetragen.

Eine weitere Eigenschaft der (hier betrachteten) Schwankung der Einsatzspannung ist wie bereits erwähnt die fehlende Korrelation, d.h. direkt benachbarte Transistoren können, mit der einer Normalverteilung entsprechenden Wahrscheinlichkeit, Einsatzspannungsunterschiede von bis zu 6 Standardabweichungen aufweisen. Bei einer Standardabweichung von 40mV der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Einsatzspannung entspricht dies einer Differenz von $6 \times 40\text{mV} = 240\text{mV}$ zwischen den Einsatzspannungen benachbarter Transistoren. Die fehlende Korrelation führt nun dazu, daß die Ausbeutekurve eines Pfades von der Anzahl n der Pfade identischen Aufbaus (d.h. desselben Typs) abhängt.

Pfade identischen Aufbaus werden im folgenden als Pfadensemble bezeichnet (eine breitere Definition dieses Begriffs wird später gegeben). Fig. 4 zeigt die Ausbeutekurven der Pfadensemble vom Typ B mit $n = 1, 10, 100, 1000$ und 10000. Die Kurve für $n = 1$ entspricht der Ausbeutekurve K2, d.h. der Ausbeutekurve eines Pfads. Die Ausbeutekurven für $n > 1$ erhält man durch Potenzieren der Ausbeutekurve K2 mit der Anzahl n der Pfade des Pfadensembles. Fig. 4 zeigt, daß die Taktperi-

ode (d.h. die Länge des Pfadensembles) für ein bestimmtes Ausbeuteniveau, z.B. 90%, dabei zunimmt. Die Zunahme ist in Fig. 4 durch den Pfeil P graphisch veranschaulicht.

- 5 Anhand Fig. 5 wird erläutert, warum bei dem in Fig. 1 dargestellten Schaltungsbeispiel die herkömmliche Ermittlung des kürzesten Pfads unter den genannten Voraussetzungen zu einem falschen Ergebnis hinsichtlich der Ermittlung des kritischen Pfades führt. Die Kurve K3 entspricht der in Fig. 4 gezeigten
- 10 Ausbeutekurve für $n = 1000$ Pfaden des Pfadensembles der Pfade vom Typ B. Die Ausbeutekurve des Pfades P1 (allgemeiner: des Pfadensembles der Pfade vom Typ A) ist in Fig. 5 mit K4 bezeichnet. Der Mittelwert der dazugehörigen Wahrscheinlichkeitsverteilung liegt bei einer Taktperiode von 10ns, da er
- 15 bei einer Ausbeute von 50% auftritt. Fig. 5 macht deutlich, daß bei einer geforderten Ausbeute von 90% die beiden Pfadensemble A und B in etwa gleichgewichtig die Leistungsfähigkeit der Schaltung beeinflussen. Sind mehr Pfade vom Typ B vorhanden oder ist die Schwankung der Gatterlaufzeiten größer (bei
- 20 diesem Beispiel wurde wie bereits erwähnt eine Gatterlaufzeitschankung von 15% zugrunde gelegt), so wird die Leistungsfähigkeit ausschließlich von den Pfaden des Typs B bestimmt. In diesem Fall müssen also die Pfade P1', ..., Pn' und nicht der Pfad P1 optimiert werden, um das Leistungsver-
- 25 halten der Schaltung zu verbessern.

Im folgenden wird weiterhin unter Bezugnahme auf das Schaltungsbeispiel in Fig. 1 ein möglicher Ablauf des erfindungsgemäßen Verfahrens erläutert.

30

- Zunächst werden die in der integrierten Schaltung vorgesehenen Pfade und ihre mittleren Pfadlaufzeiten sowie die Standardabweichung der Pfadlaufzeitverteilung bestimmt. Letztere ist wie bereits erwähnt gleich der Wurzel der Summe der quadrierten Gatterlaufzeit-Standardabweichungen.
- 35

Nachfolgend können zur Reduzierung des Rechenaufwands diejenigen Pfade, welche die Verarbeitungsgeschwindigkeit der integrierten Schaltung mit Sicherheit nicht begrenzen, verworfen werden. Dies kann beispielsweise dadurch geschehen, daß

5 sämtliche Pfade, deren Pfadlaufzeit kleiner als $0,8 \times T_m$ ist, in den folgenden Verfahrensschritten nicht mehr berücksichtigt werden. Dabei bezeichnet T_m die längste aufgefundene mittlere Pfadlaufzeit, d.h. in dem in Fig. 1 dargestellten Beispiel 10ns des Pfades P1. Da die Pfade des Typs B dieser

10 Bedingung nicht genügen, werden sie nicht verworfen.

Anschließend werden diejenigen Pfade zusammengefasst, deren statistische Kenngrößen übereinstimmen. Zusammengefaßte Pfade bilden ein Pfadensemble. Die einfachste Möglichkeit besteht

15 darin, daß jedes Ensemble ausschließlich aus identischen Pfaden besteht. In Fig. 1 wird ein erstes Pfadensemble durch den Pfad P1 des Typs A gebildet, und ein zweites Pfadensemble wird durch die Pfade P1', P2', ..., Pn' des Typs B geschaffen. Eine allgemeine Definition für ein Ensemble besteht darin,

20 daß die in dem Ensemble enthaltenen Pfade alle im wesentlichen identische mittlere Pfadlaufzeiten und Pfadlaufzeit-schwankungen aufweisen, d.h. in Bezug auf ihre statistischen Kenngrößen identisch oder zumindest ähnlich sind.

25 In einem nächsten Schritt werden die Mittelwerte und Standardabweichungen der Pfadlaufzeiten der Pfadensemble bestimmt. Zur Reduzierung des Rechenaufwands kann die Verteilungsfunktion der n Pfade des Ensembles durch die mit n multiplizierte Verteilungsfunktion (Wahrscheinlichkeitsdichte) eines Pfades

30 dargestellt werden. Dieser Schritt ist in Fig. 6 für das anhand Fig. 1 erläuterte Beispiel veranschaulicht. Durch das Aufsummieren von Verteilungsfunktionen geht man von den Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktionen zu einer Häufigkeitsverteilung von Pfadlaufzeiten über, welche auf der logarithmisch

35 eingeteilten Ordinate des in Fig. 6 dargestellten Diagramms aufgetragen ist. Die Kurve K5 ergibt sich durch die Multiplikation der Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion (d.h. der Wahr-

scheinlichkeitsverteilung) für einen Pfad des Typs B mit $n = 1000$. Das analoge Vorgehen ergibt für das Ensemble der Pfade des Typs A die Kurve K6, wobei hier $n = 1$ gilt, da das Ensemble nur in einen Pfad, P1, umfaßt (insofern bleibt es hier bei einer Wahrscheinlichkeitsverteilung).

Nachfolgend werden gemäß Fig. 7 die aufsummierten Verteilungsfunktionen (d.h. im allgemeinen Fall die den Ensembles zugeordneten Wahrscheinlichkeitsverteilungen entsprechend K5 und Häufigkeitsverteilungen entsprechend K6) beginnend bei einer Pfadlaufzeit von unendlich großen zu kleinen Pfadlaufzeiten hin aufintegriert. Das dabei erhaltene Integralmaß läßt sich in der Form

$$M(T) = \int_{-\infty}^{\infty} F(T') dT' - \int_{-\infty}^T F(T') dT'$$

darstellen, wobei T die Pfadlaufzeit bezeichnet, $M(T)$ das Integralmaß bezeichnet, T' eine Integrationsvariable ist und $F(T')$ die aufsummierte Verteilungsfunktion eines Pfadensembles ist.

In Fig. 7 stellt die gepunktete Linie B das Integralmaß der aufsummierten Verteilung (Kurve K5) der 1000 Pfade des Typs B dar, während die mit einem dünnen Strich durchgezogene Linie A die Verteilung (Kurve K6) des Pfads P1 vom Typ A ist.

In einem weiteren Schritt wird nun die mit einer fetten durchgezogenen Linie dargestellte Kurve S berechnet, welche die Summe der beiden Kurven A und B ist. Die Kurve S repräsentiert das Integralmaß der Gesamtheit aller betrachteten Pfade der der Analyse zugrunde liegenden Schaltung (die Integralmaße sind logarithmisch aufgetragen, der Unterschied zwischen den Kurven S und B ist daher nur bei kleinen Werten des Integralmaßes sichtbar).

Der Additionsschritt zur Ermittlung des Gesamt-Integralmaßes (Kurve S) kann selbstverständlich auch bereits vor der Integration durch Addition der Häufigkeitsverteilungen/Wahrscheinlichkeitsverteilungen (K5 und K6) erfolgen.

5

Schließlich werden der oder die kritischen Pfade der Schaltung anhand eines Vergleichs der Integralmaße A und B unter Berücksichtigung des Gesamtmaßes S ermittelt.

- 10 Fig. 8 zeigt den Verlauf der Kurven A, B, S innerhalb des in Fig. 7 dargestellten Ausschnitts E in größerer Einzelheit. Zunächst wird eine kritische Taktrate T_c bestimmt, bei der das Gesamtmaß einen Wert x aufweist, wobei x eine der geforderten Ausbeute entsprechende Größe darstellt. Die Beziehung
 15 zwischen der Größe x und einer geforderten Ausbeute A (in Prozent) lautet $A = (1-x) \cdot 100$ [%], d.h. bei einer geforderten Ausbeute von 90% beträgt $x = 0,1$.

- In Fig. 8 ergibt sich für $x = 0,1$ eine kritische Taktrate T_c
 20 $= 10,75\text{ns}$. Dann werden alle Pfade von Pfadensembeln, die in dem Intervall zwischen T_c und $T = \infty$ zum Gesamt-Integralmaß S beitragen, als kritische Pfade bestimmt.

- Aus Fig. 8 ist ersichtlich, daß Pfade des Typs A (Kurve A) und Pfade des Typs B (Kurve B) bei $x = 0,1$ in etwa gleichermaßen zum Gesamt-Integralmaß S beitragen (der Pfad P1 des
 25 Typs A liefert einen Beitrag von etwa 0,055 während der Beitrag der Pfade des Typs B ungefähr 0,045 beträgt).

- 30 In einem abschließenden Schritt können diejenigen Pfade, deren Beitrag vergleichsweise gering ist und einen vorgegebenen Grenzwert unterschreitet, aus der Menge der aufgefundenen kritischen Pfade eliminiert werden. Der Grenzwert hängt von der Größe der Schaltung ab. In dem in Fig. 8 dargestellten
 35 Beispiel existiert kein derartiger Pfad.

Die beschriebenen Verfahrensschritte werden im Rahmen einer rechnergestützten Analyse oder Simulation der Schaltung auf der Basis eines Schaltungsentwurfes durchgeführt. Der Schaltungsentwurf wird dann in Abhängigkeit von den aufgefundenen

5 kritischen Pfaden optimiert.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Bestimmen eines oder mehrerer kritischer
5 Pfade einer integrierten Schaltung, welche die Verarbeitungsgeschwindigkeit der integrierten Schaltung begrenzen, mit den Schritten:

(a) Bestimmen der in der integrierten Schaltung vorgesehenen
Pfade ($P_1; P_1', \dots, P_n'$), ihrer mittleren Pfadlaufzeiten
10 und ihrer Pfadlaufzeitschwankungen;

(b) Ordnen der Pfade ($P_1; P_1', \dots, P_n'$), wobei Pfade, die im
wesentlichen eine identische mittlere Pfadlaufzeit und
eine identische Pfadlaufzeitschwankung aufweisen, ein
Pfadensemble (A, B) bilden;

15 (c) zu jedem Pfadensemble (A, B) Berechnen eines Ensemblemaßes (M), welches die Pfadlaufzeitverteilung dieses Pfadensembles statistisch beschreibt;

(d) für die Gesamtheit der betrachteten Pfade Berechnen eines
Gesamtmaßes, welches die Pfadlaufzeitverteilung der Ge-
20 samtheit der betrachteten Pfade statistisch beschreibt;

(e) Bestimmen des oder der kritischen Pfade der Schaltung anhand eines Vergleichs der Ensemblemaße bei oder oberhalb
einer kritischen Pfadlaufzeit T_c , welche unter Berücksichtigung des Gesamtmaßes ermittelt wird.

25 2. Verfahren nach Anspruch 1,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,

- daß im Schritt (e) ein Wert für das Gesamtmaß vorgegeben
wird und die kritische Pfadlaufzeit T_c als diejenige Pfad-
30 laufzeit ermittelt wird, bei welcher das Gesamtmaß den vorgegebenen Wert annimmt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,

35 - daß als kritische Pfade diejenigen Pfade ($P_1; P_1', \dots, P_n'$) bestimmt werden, deren Ensemblemaße bei oder oberhalb T_c einen vorgebbaren Schwellenwert überschreiten.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
daß nach Schritt (a) der folgende Schritt eingefügt wird:

- 5 (a1) Verwerfen derjenigen Pfade ($P_1; P_1', \dots, P_n'$), deren
mittlere Pfadlaufzeit kleiner als $\alpha \times T_m$ ist, wobei T_m
die maximale im Schritt (a) ermittelte mittlere Pfad-
laufzeit ist und α eine Größe kleiner als 1 ist und ins-
besondere etwa 0,8 beträgt.

10

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
- daß das Ensemblemaß gegeben ist durch das Integral über die
Summe der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Pfadlaufzei-
15 ten der Pfade des betrachteten Pfadensembles, und
- daß für die Berechnung der Summe der Wahrscheinlichkeits-
verteilungen das Produkt aus der Anzahl der Pfade des Pfa-
densembles und der Wahrscheinlichkeitsverteilung eines Pfa-
des des Pfadensembles gebildet wird.

20

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
- daß das Gesamtmaß (S) durch die Summe der Ensemblemaße (A,
B) gegeben ist.

25

Zusammenfassung

Verfahren zur Bestimmung des kritischen Pfades einer integrierten Schaltung

5

Zur Bestimmung des kritischen Pfades einer Schaltung werden zunächst die Pfade, ihre mittleren Pfadlaufzeiten und ihre Pfadlaufzeitschwankungen bestimmt. Pfade mit ähnlichen statistischen Kenngrößen werden zu einem Pfadensemble zusammengefaßt. Zu jedem Pfadensemble wird dann ein statistisches Ensemblemaß und für die Gesamtheit der betrachteten Pfade wird ein statistisches Gesamtmaß berechnet. Zuletzt werden anhand eines Vergleichs der Ensemblemaße bei oder oberhalb einer kritischen Pfadlaufzeit T_c die kritischen Pfade der Schaltung unter Berücksichtigung des Gesamtmaßes bestimmt.

10

15

1/4

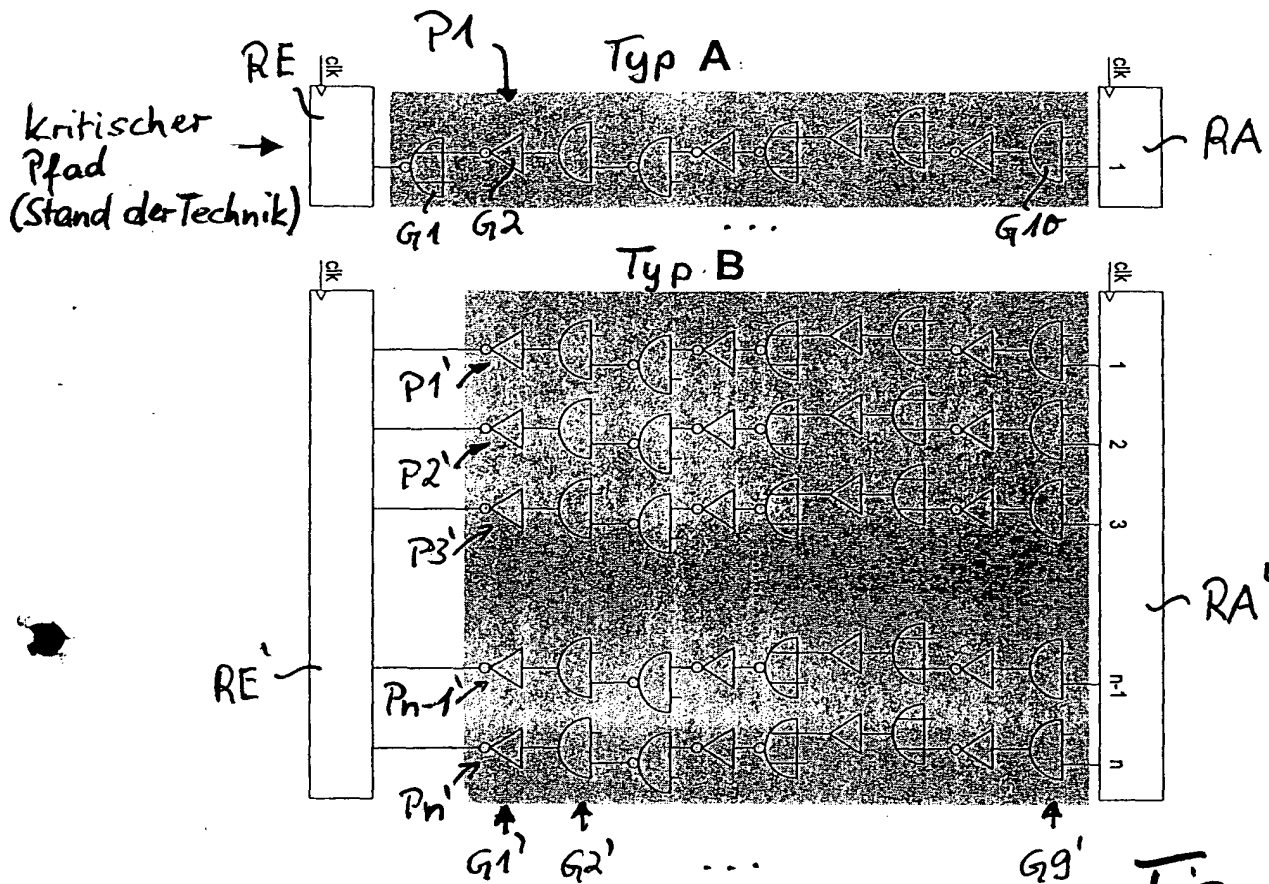


Fig. 1

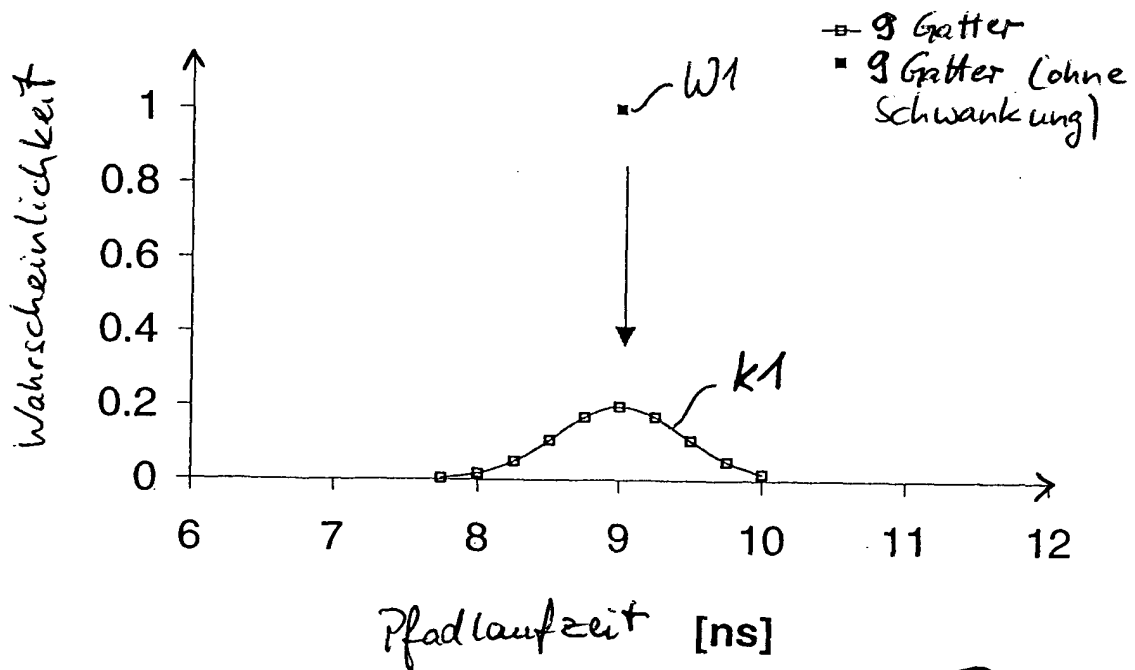


Fig. 2

2/4

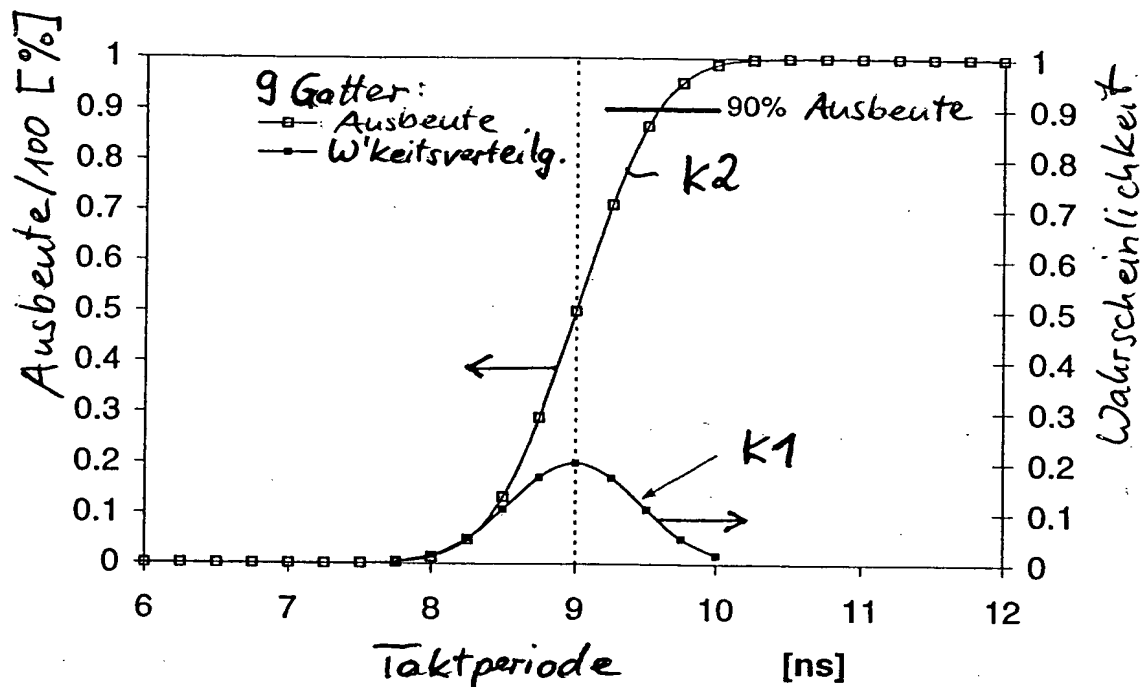


Fig. 3

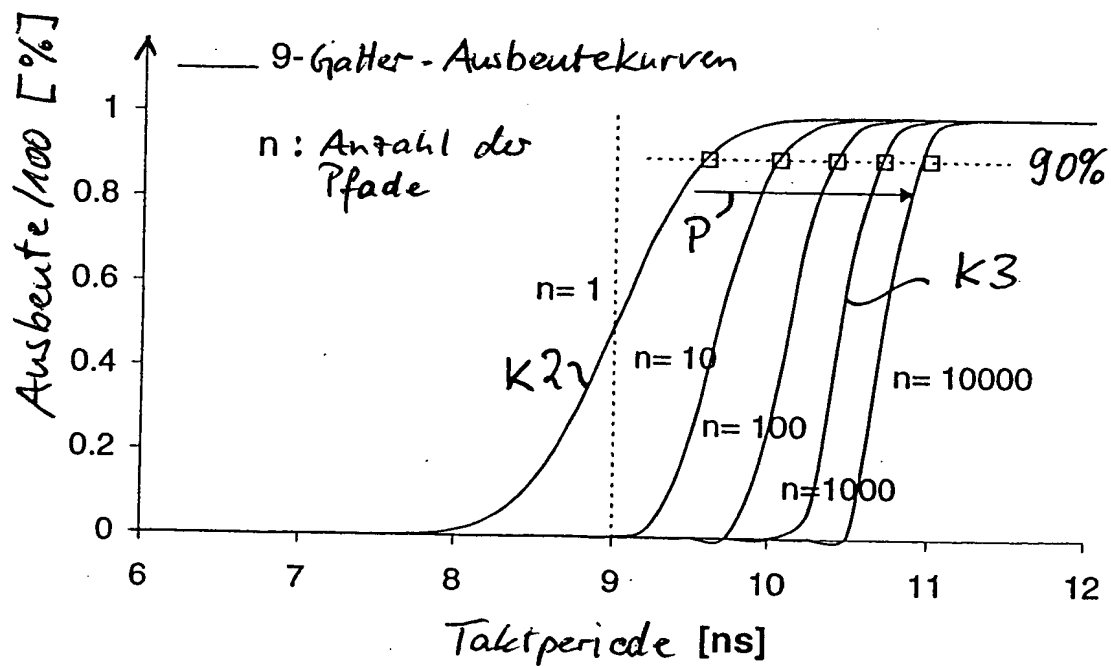


Fig. 4

3/4

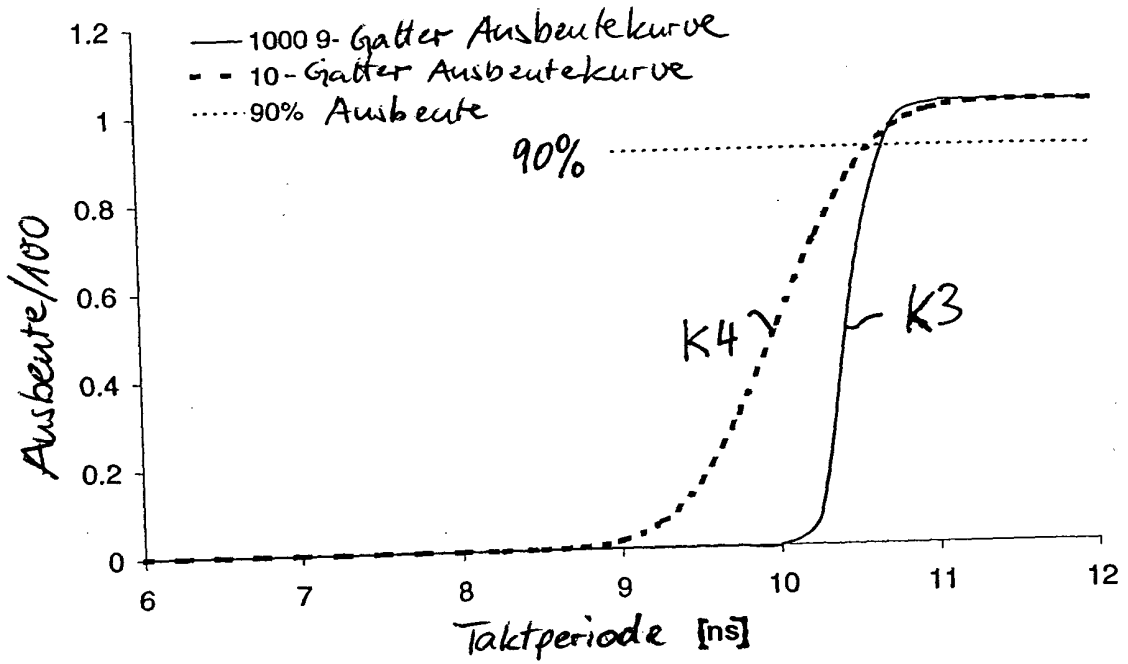


Fig. 5

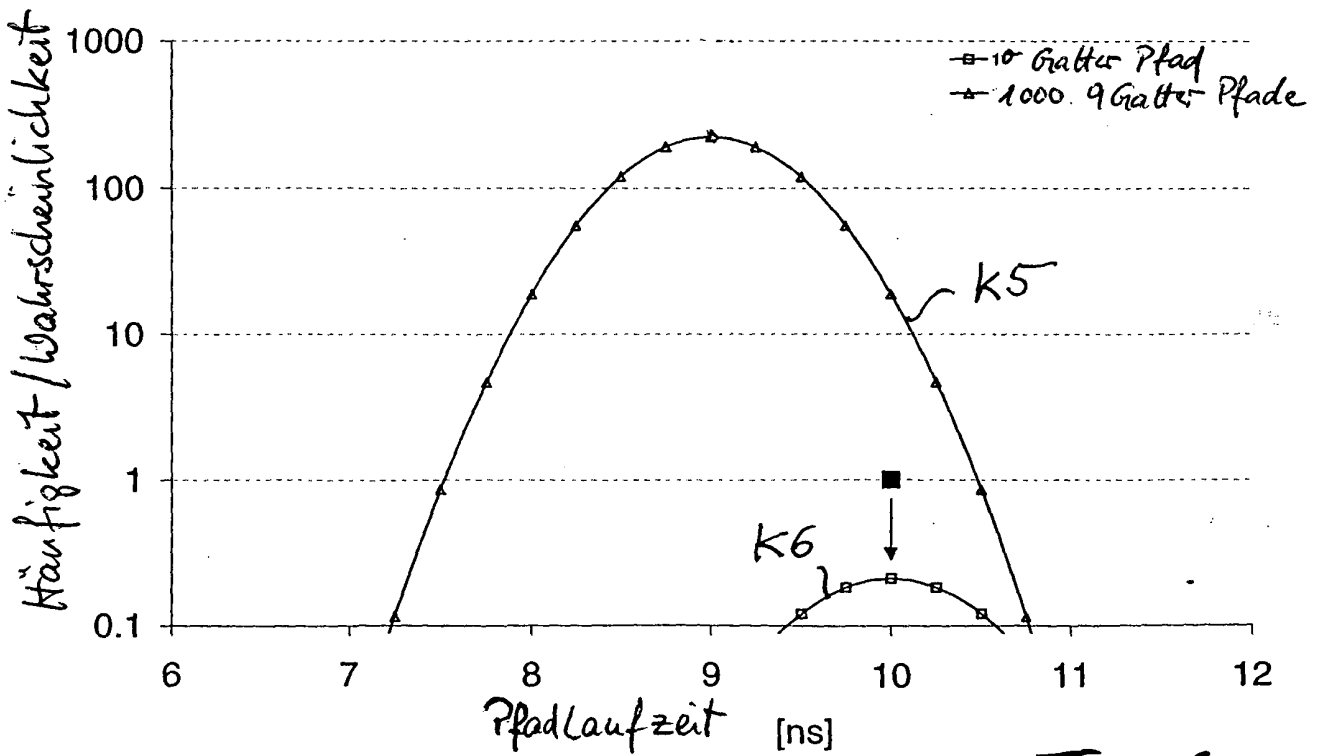


Fig. 6

4/4

